МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.833 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-13

К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес*

Н. П. Онишков[1], В. И. Короткин[2]**

[1] Академия строительства и архитектуры ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

To estimation of contact-fatigue durability of thermo-chemically strengthened gears***

N. P. Onishkov[1], V. I. Korotkin[2]**

[1]Academy of Construction and Architecture, DSTU, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена уточнению прочностных характеристик диффузионного слоя цементованных (Ц) и нитроцементованных (Нц) эвольвентных зубчатых колес. Регламентируемые ГОСТ 21354-87 зависимости предела контактной выносливости стальных деталей от твердости $\sigma_{H\lim}$ в области ограниченной (до 10–12 млн циклов) долговечности завышены.Цель работы — определить максимально допустимый уровень нагрузки эвольвентных зубчатых передач в условиях действия альтернативных форм отказа и область корректного применения рекомендаций ГОСТ 21354-87.

Материалы и методы. В поверхностно упрочненных деталях протекают одновременно глубинные и поверхностные процессы контактного разрушения с принципиально различными механизмами контактно-усталостной долговечности. Лидирующий вид разрушения определяется комплексом факторов, основные из которых — уровень напряженности и свойства приповерхностных слоев материала. Нагрузочная способность диффузионного слоя исследована на основе экспериментальных данных по методике оценки прочности структурно неоднородного материала с использованием обобщенного критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева.

Результаты исследования. Учет влияния пластических свойств материала и его изменения в пределах диффузионного слоя позволил существенно повысить достоверность прогнозирования уровня нагрузочной способности цементованных и нитроцементованных зубчатых передач по контактной прочности. Подтверждено наличие порогового значения твердости рабочей поверхности зубьев колес на уровне 60–61 единиц по Роквеллу, превышение которого ведет к снижению контактно-усталостной долговечности. Приведена оценка влияния параметра пластичности на уровень нагрузочной способности и варьирование величины этого параметра при различных видах химико-термической обработки (ХТО). В области ограниченной долговечности опережающими являются глубинные контактные разрушения. И пределы контактно-усталостной долговечности по показаниям поверхностного выкрашивания должны быть ориентированы на допускаемое нормальное контактное глубинное напряжение.

Introduction. The specification of the strength characteristics of the diffusion layer of carburized (C) and nitro-carburized (NC) involute gears is described. Regulated by GOST 21354-87, the dependence of the surface endurance limit of steel parts on hardness $\sigma_{H\lim}$ in the region of finite (up to 10-12 million cycles) life is overstated. The work objective is to determine the maximum allowable load level of the involute gearing under the conditions of alternative failure forms and the area of correct application of GOST 21354-87 recommendations.

*Materials and Methods****.*** In the case-hardened parts, both deep and surface processes of contact fracture occur simultaneously. However, these processes have essentially different mechanisms of contact-fatigue durability with fundamentally different mechanisms of the contact-fatigue life. The high-end fracture mode is determined by a variety of factors, the key ones being the level of intensity and the properties of the near-surface layers of the material. The loading capacity of the diffusion layer is investigated on the basis of the experimental data by the strength assessment procedure of a structurally inhomogeneous material. Here, Pisarenko-Lebedev generalized criterion of limiting state is used.

Research Results. Consideration of the effect of the plastic properties of the material and its variation within the diffusion layer has allowed significantly increase the forecasting validity of the loading capacity level of the carburized and nitro-carburized gears for contact strength. The occurrence of the threshold value of the working surface hardness of the wheels teeth is confirmed at the level of 60–61 Rockwell units. This level increase leads to the decrease in contact-fatigue life. The plasticity parameter impact on the capability level and the variation of this parameter value for different types of the thermo-chemical treatment (TCT) is assessed. In the finite life area, deep contact fractures are leading. And the limits of contact fatigue life upon surface pitting readings

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 9.4726.2017/8.9).

**E-mail: onishkova1@yandex.ru, korotkin@math.rsu.ru

*** The research is done with the support from Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 9.4726.2017/8.9).

Обсуждение и заключение. С экспериментальными данными полученные результаты качественно согласуются, но в ряде случаев несколько превышают их. Необходимы исследования по величине параметра пластичности и его изменению в зависимости от химического состава стали и вида ХТО. Но уже на данном этапе полученные результаты могут быть использованы при проектировании тяжело нагруженных поверхностно упрочненных зубчатых передач при назначении твердости поверхности и толщины диффузионного слоя. Область применения — передачи бортовых редукторов тракторов, нефтедобывающих станков-качалок, горнодобывающего и подъемно-транспортного оборудования.

should be oriented to the allowed normal deep contact stress.

Discussion and Conclusions. The obtained results are in qualitative agreement with the experimental data, but they exceed them a little in some cases. Studies on the plasticity parameter value and its variation depending on the chemical composition of the steel and the TCT type are needed. But already at this stage, the results obtained can be used in the design of heavy-loaded case-hardened gears to determine the surface hardness and the diffusion layer thickness. The application domain includes the tractor track gear transmissions, oil-producing beam engines, mining and handling facilities.

Ключевые слова: зубчатая передача, контактная прочность, химико-термическая обработка, конкурирующие виды отказов, упрочненный слой, твердость, критерии прочности.

Keywords: gear, contact strength, thermo-chemical treatment, competing failure modes, hardened layer, hardness, strength criteria.

Образец для цитирования: Онишков, Н. П. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес / Н. П. Онишков, В. И. Короткин// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 5–13.

For citation: N.P. Onishkov, V.I. Korotkin. To estimation of contact-fatigue durability of thermo-chemically strengthened gears. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 5–13.

Введение. Несмотря на многолетние исследования, проблема контактно-усталостной долговечности элементов машин и механического оборудования не теряет актуальности. Методы ее прогнозирования довольно условны, а результаты противоречивы.

В настоящее время в инженерной практике используются кусочно-линейные зависимости предела контактной выносливости стальных деталей от твердости: $\sigma_{H\,\lim} = 23\,H_{HRC_Э}$ по ГОСТ 21354-87 [1] или $\sigma_{H\,\lim} = 2{,}3\,H_{HB}$ по ИСО 6336 [2]. Эти зависимости соответствуют усредненным значениям пределов контактной выносливости. Однако рекомендации [1] для случаев цементации и нитроцементации распространены на интервал твердостей 56–65 $H_{HRC_Э}$. Между тем ряд нормативов ограничивают весьма высокие весовые коэффициенты влияния твердости уровнем 58–60 $H_{HRC_Э}$, указывая, что превышение этого уровня дает противоречивые результаты. Кроме того, в области ограниченной долговечности рекомендации [1] представляются неоправданно завышенными. Так, при числе циклов нагружения $N = 10^7$ и твердости 60 $H_{HRC_Э}$ предел контактной выносливости $\sigma_{H\,\lim}$ = 2100 МПа. При этом даже эвольвентные передачи со шлифованными зубьями, работающие в благоприятном упругогидродинамическом режиме смазки, поражаются прогрессирующим питтингом при напряжениях σ_H > 1500–1600 МПа уже на ранних стадиях эксплуатации. Однако опережающими могут явиться альтернативные виды отказа [3, 4].

Исследования последних лет показали необходимость корректировки стандарта — в частности, снижения $\sigma_{H\,\lim}$ в области длительной прочности [5], аналогичной представленной в стандарте ISO 6336 [2]. Верхний предел твердости зубьев ограничен уровнем 62–63 $H_{HRC_Э}$ [2, 6] по причине опасности хрупкого разрушения, однако прогнозирование этого вида отказа пока носит преимущественно качественный характер. Уточнение количественных оценок прочности связано с учетом пластических свойств материала и их изменением при термической и химико-термической обработке (ХТО). Такой подход был использован в работах [7, 8], продолжением которых является настоящая статья.

Постановка задачи. Основным видом контактных повреждений эвольвентных зубьев считается усталостное выкрашивание их рабочих поверхностей, т. н. питтинг (рис. 1).

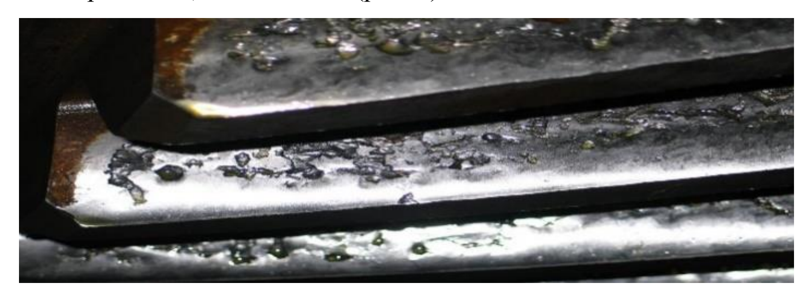
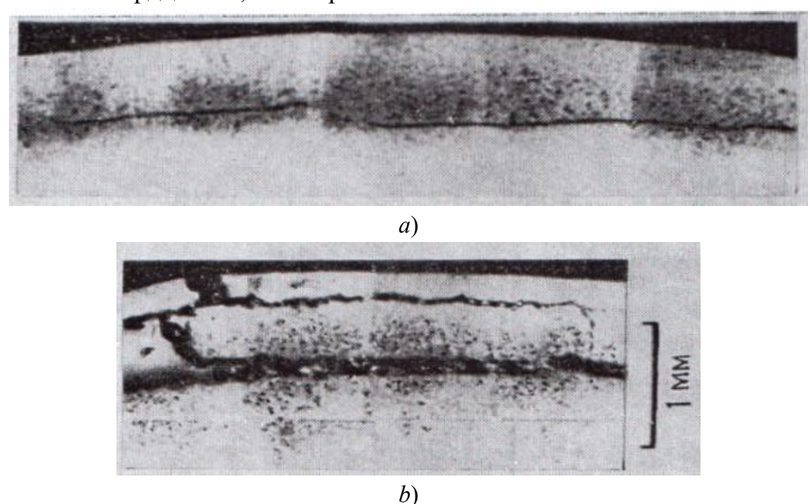


Рис. 1. Типичный вид поверхностного выкрашивания (питтинга)

Fig. 1. Typical appearance of surface pitting

Но поскольку максимальные эквивалентные напряжения локализованы на определенной глубине, то при высоких контактных напряжениях, особенно при поверхностном упрочнении деталей, возможно опережающее развитие подповерхностных дефектов — глубинных контактных разрушений (ГКР, рис. 2) как в упрочненном слое, так и в области перехода к неупрочненной сердцевине, т. е. отрыв слоя.



a)

b)

Рис. 2. Глубинные контактные разрушения, поперечные микрошлифы [9]: в эффективной зоне (*a*);
на двух уровнях (в эффективной зоне и в подслое) (*b*)

*Fig. 2. Deep contact fracture, transverse microsections [9]: in effective zone (a);
at two levels (in effective zone and in sub-layer) (b)*

И глубинные, и поверхностные процессы протекают одновременно, но механизмы контактно-усталостной долговечности этих процессов принципиально различны, и лидирующий вид разрушения определяется комплексом факторов, основные из которых — уровень напряженности и свойства приповерхностных слоев материала.

Цель работы — определить максимально допустимый уровень нагрузки эвольвентных зубчатых передач в условиях действия альтернативных форм отказа и область корректного применения рекомендаций [1]. Объект исследования — зубчатые колеса и модели (ролики), упрочненные ХТО. Аппарат исследования — методика оценки прочности структурно неоднородного материала на базе обобщенного критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева [10].

Нагрузочная способность в области ограниченной долговечности деталей, упрочненных ХТО. На графиках (рис. 3) приведены экспериментальные данные по контактно-усталостной долговечности цементованных и нитроцементованных деталей (зубчатых шестерен и роликов).

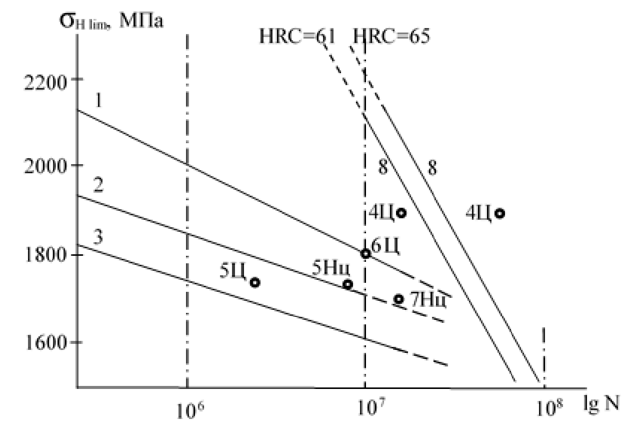


Рис. 3. Контактно-усталостная долговечность цементованных (Ц) и нитроцементованных (Нц) зубчатых шестерен и роликов: 1, 2, 3 — ролики CD-30, CC-60 и CD-60 соответственно, Ц — ГКР [9]; 4 — шестерни модуля *m* = 4,0 мм, Ц — ГКР, питтинг [3]; 5 — шестерня *m* = 6,5 мм, сталь 20ХН3А, Ц — ГКР, Нц — питтинг [11]; 6 — шестерня *m* = 6,0 мм, сталь 20ХН3А, Ц — ГКР; 7 — шестерня *m* = 6,0 мм, сталь 20ХН3А, Нц — питтинг [12]; 8 — легированные Ц и Нц эвольвентные шестерни по пределу контактной выносливости при твердости рабочих поверхностей зубьев 61 и 65 HRC на базе $N = 10^7$ циклов [1]

Fig. 3. Contact fatigue life of carburized (C) and nitro-carburized (NC) gears and rollers: 1, 2, 3 – rollers CD-30, CC-60 and CD-60, respectively, Ц – DCF [9]; 4 – modular gears m = 4.0 mm, Ц - ГКР, pitting [3]; 5 – gear m = 6.5 mm, steel 20XH3A, Ц - DCF, Нц - pitting [11]; 6 – gear m = 6.0 mm, steel 20XH3A, Ц - DCF; 7 – gear m = 6.0 mm, steel 20XH3A, Нц - pitting [12]; 8 – doped involute gears C and NC in contact endurance limit at teeth face hardness of 61 and 65 HRC based on $N = 10^7$ *cycles [1]*

Здесь 1, 2, 3 — ролики из хромомолибденовой стали [9]: 1 — ролики CD-30 диаметром D = 30 мм с твердостью поверхности $H_0 = 795HV$, эффективной глубиной упрочнения (до твердости 550 HV) h_{te} = 1,08 мм; 2 — ролики CC-60, D = 60 мм, $H_0 = 838HV$, h_{te} = 2,30 мм; 3 — ролики CD-60, D = 60 мм, $H_0 = 850HV$, h_{te} = 1,37 мм. Твердость $H_к$ сердцевины у всех образцов около 260HV.

Для роликов CD-30 и CC-60 при действующих напряжениях σ_H = 1717–2158 МПа и расчетной полуширине площадки контакта $b_H \le$ 0,28 мм (CD-30) и $b_H \le$ 0,58 мм (CC-60) причиной выхода образцов из строя явились глубинные контактные разрушения на глубинах h = 0,10–0,39 мм. При этом твердость слоя в данном интервале изменялась от 790 HV до 760 HV CD-30. Твердость слоя в интервале h = 0,16–0,72 мм изменялась от 835 HV до 810 HV (CC-60). Отношение $h_{te} / b_H > 3$ гарантировало, что недостаточная прочность подслоя не оказывает негативное влияние на уровень нагрузочной способности детали, т. е. отказ явился следствием исчерпания несущей способности собственно упрочненного слоя. Прочность образцов CB-60 была существенно ниже вследствие слабости подслоя и возникновения очагов разрушения на двух уровнях — в эффективной и переходной зонах.

Точного соотношения чисел твердости по Виккерсу и по другим шкалам не существует, приближенно 760–800 $HV \approx$ 61–62 $HRC_э$. При числе циклов нагружения $N = 10^7$ и $H_0 = 61HRC_э$ $\sigma_{H\lim} = 23H_{HRCэ} \cdot Z_N$ МПа. Принимая рекомендуемые [1] для данного уровня твердости коэффициент долговечности Z_N = 1,513, коэффициент запаса прочности $S_{H\min}$ = 1,2, коэффициент шероховатости $Z_R = 1{,}0$ (шлифование) и коэффициент окружной скорости Z_v = 1,0, получаем $\sigma_{HP} = 23H_{HRC}Z_N Z_R Z_v / S_{H\min} \approx 1790$ МПа. Это практически совпадает с пределом контактной выносливости по критерию глубинной контактной прочности. Однако если по критерию глубинной контактной прочности имеем напряжения разрушения, то по критерию поверхностной — допускаемые σ_{HP}, т. е. не вызывающие опасной контактной усталости материала.

Очевидно, в области ограниченной долговечности при $N \le (1\ldots2)10^7$ циклов лимитирующими являются преимущественно ГКР. Расчеты показали, что при качественном выполнении ХТО область с минимальным коэффициентом запаса прочности по критерию ГКР соответствует глубине слоя h = 0,8–0,9 b_H. Однако при относительно незначительном снижении твердости (несколько десятков единиц по Виккерсу) область ГКР распространяется на глубину до h = 1,3–1,5 b_H, где действующие эквивалентные напряжения по любым критериям существенно ниже. А так как развитие первичной трещины происходит в направлении менее энергоемкого интеркристаллитного разрушения, т. е. к поверхности, то указанные глубины также должны рассматриваться как потенциально опасные. На базе $N = 10^7$ циклов $\sigma_{H\lim}$ при цементации находится в пределах 1800–1700 МПа (рис. 3).

Заслуживает внимания факт снижения прочности образцов CC-60 по сравнению с CD-30 при повышенной на расчетных глубинах твердости слоя 820–835 HV у образцов CC-60 и 760–790 HV у образцов CD-30, хотя логично было бы ожидать противоположное.

Анализ прочностных характеристик диффузионного слоя. Общепризнано, что повышение твердости определяет и повышение контактной прочности стальных деталей. Для сталей с твердостью H< 450–500 HB имеет место близкая к линейной зависимость предела прочности при растяжении $\sigma_{в+} \approx 0{,}34\, H_{HB}$ (предел прочности при сжатии $\sigma_{в-}$ для пластичных сталей не определяется), а условные пределы текучести $\sigma_{0,2+}$ и $\sigma_{0,2-}$ принимаются равными. Однако дальнейшее повышение твердости ведет к нарушению этих соотношений — отчетливо проявляются различия в пределах прочности при растяжении и сжатии: $\sigma_{в-} > \sigma_{в+}, \sigma_{0,2+} \to \sigma_{в+}, \sigma_{0,2-} << \sigma_{в-}$.

Разрушение будет хрупким или смешанным в зависимости от жесткости нагружения. Роль сдвиговых напряжений в процессе разрушения с ростом хрупкости материала снижается, что наблюдается у подшипниковых и инструментальных сталей после закалки, а твердость уже не является достаточным показателем прочности материала. Так, были испытаны нешлифованные передачи трактора ДТ-75 [11] с межцентровым расстоянием a_w = 276,25 мм, модулем m = 6,5 мм, числами зубьев z_1 = 13, z_2 = 65. При расчетных напряжениях σ_H = 1750 МПа, числе оборотов

шестерни n_1 = 220 мин$^{-1}$ цементованные передачи выходили из строя после 200 часов по причине ГКР, распространяющихся на глубину до 1,4 мм. Такие же передачи, но нитроцементованные на указанных глубинах даже при меньшей твердости выходили из строя по причине питтинга при наработке свыше 700 часов. Это связывают с повышенной (вследствие меньшего размера аустенитного зерна) пластичностью нитроцементованных слоев по сравнению с цементованными.

В общем случае прочность материала определяется его способностью сопротивляться как касательным, так и нормальным напряжениям. В условиях значительной структурной неоднородности диффузионного слоя наиболее эффективным оказалось использование критерия предельного состояния Писаренко — Лебедева для структурно неоднородного материала [10, 13]. Применительно к контактным задачам действующие σ_e и допускаемые σ_{HKPe} эквивалентные напряжения для ГКР определялись по формулам:

$$\sigma_e = \chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 A^{1-(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/\sigma_1} \le \sigma_{HKPe}, \quad (1)$$

$$\sigma_{HKPe} = \chi(\chi - 0{,}11128) H_{HV} Z_{NK} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 , \quad (2)$$

где $\chi = \sigma_{e+} / \sigma_{e-}$ — параметр пластичности материала, учитывающий степень участия сдвиговых деформаций в микроразрушении; σ_{e+}, σ_{e-} — напряжения отказа (разрушения) материала при одноосном растяжении и сжатии соответственно; A — параметр дефектности, для закаленных сталей A = 0,7–0,8; $Z_{NK} = (10^7 / N_{EK})^{1/m}$ — коэффициент долговечности; $K_1 - K_5$ — коэффициенты, учитывающие характер контактирования, количество потенциально опасных зон, влияние касательной нагрузки, качество материала и ХТО, разброс свойств материала в слое [10].

Повышение твердости определяет повышение контактной прочности стальных деталей. Но одновременно имеет место снижение пластических свойств материала с противоположной тенденцией. Следовательно, существует некоторое пороговое значение твердости стали, за которым дальнейшее ее повышение будет давать отрицательный эффект. Например, долговечность подшипников качения снижалась при повышении твердости свыше 64–65 $HRC_э$ [14]. Это особенно важно для оценки нагрузочной способности диффузионного слоя с его резкой структурной и, следовательно, прочностной неоднородностью.

В пределах упрочненного слоя происходит изменение структур от заэвтектоидных в приповерхностной зоне к доэвтектоидным — в переходной. В соответствии с этим свойства упрочненного слоя принимались аналогичными свойствам закаленных сталей близкого химсостава: высокоуглеродистых для эффективной зоны, среднеуглеродистых конструкционных — для переходной [15]. Сердцевина детали сохраняет свойства термоулучшенной стали. В рамках предложенной модели изменение этих свойств учитывается изменением параметра пластичности. Обработка доступных экспериментальных данных, сводка которых приведена в [10], позволила (естественно, в первом приближении) принять χ = 1 для термоулучшенных сталей и χ = 0,6–0,7 при H = 62–64 $HRC_э$ для качественных легированных инструментальных и подшипниковых сталей. При закалке конструкционных углеродистых сталей возможно снижение параметра χ до 0,45–0,55.

Влияние параметра χ на прочность весьма существенно. Так, для стали ШХ-15 при твердости 60–62 $HRC_э$ и χ = 0,6 в условиях плоской деформации глубина залегания максимальных эквивалентных напряжений по критерию Писаренко — Лебедева увеличилась на 15 % (по сравнению с критерием Мизеса). Зона повышенной относительной напряженности, выражаемой отношением текущего эквивалентного напряжения к максимальному $\sigma_e / \sigma_{e\max}$ > 0,95, распространилась вдоль центральной оси в интервале h = 0,75–1,15 b_H, а по критерию Мизеса — в интервале h = 0,50–0,95 b_H.

Повышение твердости в зоне повышенной относительной напряженности, например на глубине h = 1,0 b_H, с 750 HV до 825 HV (CD-30 и CC-60 [9]) привело не к росту нагрузочной способности, а к снижению приблизительно на 4 %, что вполне соответствует результатам экспериментов.

На графиках (рис. 4) приведены данные относительно изменения механических характеристик закаленной углеродистой стали ШХ-15.

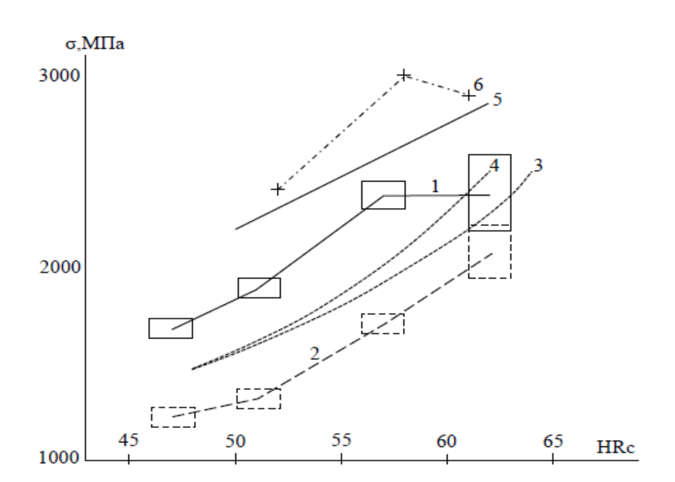


Рис. 4. Изменение механических свойств закаленной углеродистой стали ШХ-15 в зависимости от твердости: 1, 2 — $\sigma_{в+}$ и $\sigma_{0,5+}$ [16]; 3 — $\sigma_{H\lim}$ [17]; 4 — $\sigma_{0,5-}$ при остаточном аустените до 5 % [18]; 5 — $\sigma_{см}$ — допускаемые напряжения по смятию конструкционных сталей [1]; 6 — $\sigma_{в-}$ [10]

Fig. 4. Change in mechanical properties of hardened carbon steel ШХ-15 depending on hardness: 1, 2 – $\sigma_{в+}$ and $\sigma_{0,5+}$ [16]; 3 – $\sigma_{H\lim}$ [17]; 4 – $\sigma_{0,5-}$ with residual austenite up to 5% [18]; 5 – $\sigma_{см}$ – allowable stresses on collapse of structural steels [1]; 6 – $\sigma_{в-}$ [10]

Обращает на себя внимание снижение (или стабилизация) пределов прочности как на растяжение $\sigma_{в+}$, так и на сжатие $\sigma_{в-}$ при $H > 58$ $HRC_э$, что также усиливает сомнение в корректности экстраполяции на эти уровни рекомендованных [1] линейных зависимостей для $\sigma_{H\lim}$ и σ_{HP}.

Сопоставление применения процессов цементации и нитроцементации показывает, что нитроцементация обеспечивает более высокий уровень несущей способности. Различие в контактно-усталостной долговечности — 4 – 5 - кратное (и более) [11]. Однако в практике инженерных расчетов это никак не учитывается, оба процесса полагаются равноценными. Учет различия в пластических свойствах слоев позволил существенно уточнить расчеты. При твердости, одинаковой и постоянной по толщине образца (сталь 12Х2Н4А), $\sigma_{в+}$ образцов, подвергнутых нитроцементации, на 10–12 % выше, чем цементованных [19]. При отсутствии данных о соответствующем возрастании $\sigma_{в-}$ (рис. 4) это позволило в первом приближении принять на уровне твердости 850 H_{HV} значения параметра пластичности $\chi = 0{,}6$ (цементация сталей, не содержащих никель) и $\chi = 0{,}68$–$0{,}7$ (цементация никельсодержащих сталей и нитроцементация). С такими предпосылками при нитроцементации можно ожидать $\sigma_{H\lim b}$ в пределах 1850–2000 МПа (что, естественно, требует экспериментального подтверждения).

При отсутствии дополнительной информации изменение параметра пластичности в интервале 400–850 H_{HV} принималось линейным. По изложенной методике были проведены оценки контактной прочности рабочих поверхностей зубьев эвольвентных колес [8], результаты которых приведены на графиках рис. 5.

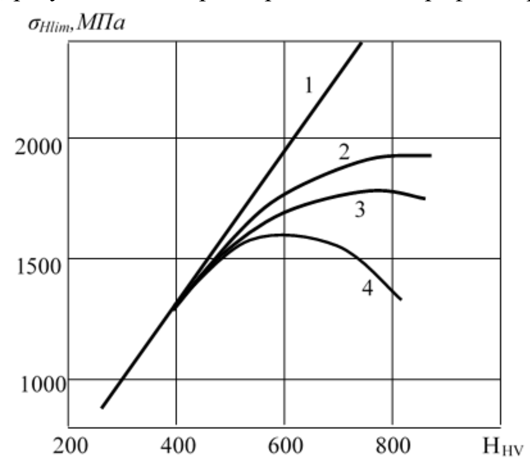


Рис. 5. Значения $\sigma_{H\lim}$ на базе 10^7 циклов при расчетном коэффициенте запаса — 1,0: по критерию Мизеса — график 1; по критерию Писаренко - Лебедева при нитроцементации, цементации и закалке среднеуглеродистых конструкционных сталей — графики 2, 3, 4 соответственно

Fig. 5. Values $\sigma_{H\lim}$ on the basis of 10^7 cycles at design safety factor – 1.0: according to Mises criterion – graph 1; to Pisarenko-Lebedev criterion under nitro-carburization, carburization and hardening of medium-carbon structural steels – graphs 2, 3, 4, respectively

С экспериментальными данными полученные результаты качественно согласуются, но в ряде случаев несколько превышают их. Так, предел поверхностной контактной прочности при нитроцементации определен на уровне 1900 МПа, что не было достигнуто ни в одном эксперименте.

Согласованная методика определения напряжения отказа при сжатии отсутствует. Например, по [20] для стали 40Х при твердости $45HRC_э$, $\sigma_{в-} = 3150$ МПа, тогда как по [21] для подшипниковой стали ШХ-15 при твердости $58HRC_э$ — $\sigma_{в-} = 2943$ Мпа. Вследствие этого значения параметра χ, полученные разными авторами, сильно разнятся. Зависимость параметра пластичности от твердости, принятая линейной, подлежит уточнению.

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы.

1. Для цементуемых конструкционных сталей повышение твердости выше 650–700 *HV* практически не ведет к повышению контактно-усталостной долговечности, а при $H > 800$ *HV* можно ожидать даже ее снижение. При наличии никеля либо при нитроцементации пик долговечности смещается в область повышенной твердости.

2. В области ограниченной долговечности ($N \le 10^7$ циклов) опережающими являются глубинные контактные разрушения. Следовательно, и пределы контактно-усталостной долговечности $\sigma_{H\lim b}$ по показаниям поверхностного выкрашивания должны быть ориентированы на допускаемое нормальное контактное глубинное напряжение σ_{HKP}. При этом для $N \le 10^7$ коэффициент долговечности $Z_N = (10^7 / N)^{0,05}$ [5].

3. Следует считать $\sigma_{HKP} \approx \sigma_{H\lim b} = 1700–1800$ МПа ($N = 10^7$ циклов, цементация) при эффективной толщине слоя $h_{te} > 2,5b_H$, что определяет положение области с минимальными коэффициентами запаса по критерию ГКР в эффективной зоне, т. е. в зоне максимальной прочности. Разброс значений твердости в интервале 700–825 *HV* в потенциально опасной зоне на уровне прочности практически не сказался, т. к. эффект повышения прочности с увеличением твердости компенсируется снижением пластических свойств материала.

4. Влияние пластических свойств весьма существенно. Так, увеличение параметра пластичности с 0,6 до 0,67–0,7 при одном и том же уровне твердости определяет повышение $\sigma_{H\lim}$ на 120–150 МПа, что соответствует известному из практики различию прочности при цементации и нитроцементации.

5. Пределы контактной выносливости $\sigma_{H\lim}$ для цементации и нитроцементаци с последующей закалкой, в отличие от рекомендаций [1], целесообразно ограничить верхним пределом твердости поверхностей $62HRC_э$.

Библиографический список

1. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые, цилиндрические, эвольвентные. Расчет на прочность / Государственный комитет по стандартам. — Москва : Издательство стандартов, 1988. — 125 с.

2. British standard. Implementation of ISO 6336-1:1996. Calculation of load capacity of spur and helical gears / Technical Committee MCE/5, Gears. — London : BSI. — 92 p.

3. Зинченко, В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 303 с.

4. Effect of case dept of fatigue strength / A. Yoshida [et al.] // Bulletin of JSME. — 1986. — № 247. — P. 228–234.

5. Коновалов, Л. В. Особенности циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности / Л. В. Коновалов, И. М. Петрова // Вестник машиностроения. — 1998. — № 9. — С. 3–11.

6. Калашников, А. С. Современные методы обработки зубчатых колес / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, П. А. Калашников. — Москва : Спектр, 2012. — 238 с.

7. Короткин, В. И. К оценке глубинной контактной выносливости эвольвентных зубчатых передач с поверхностно упрочненными зубьями / В. И. Короткин, Н. П. Онишков, А. В. Гольцев // Вестник машиностроения. — 2008. — № 5. — С. 9–14.

8. Онишков, Н. П. Об учете фактора твердости в контактных расчетах деталей машин / Н. П. Онишков, В. И. Короткин, К. В. Гузнов // Вестник НТУ «ХПИ». — 2008. — № 28. — С. 76–84.

9. Фудзита, К. Влияние глубины цементованного слоя и относительного радиуса кривизны на долговечность при контактной усталости цементованного ролика из хромомолибденовой стали / К. Фудзита, А. Иосида // Конструирование и технология машиностроения. —1981. — № 2. — С. 115–124.

10. Короткин, В. И. Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие / В. И. Короткин, Н. П. Онишков, Ю. Д. Харитонов. — Москва : Машиностроение-1, 2007. — 384 с.

11. Сопротивление контактной усталости тяжелонагруженных зубчатых колес из стали 20ХН3А, упрочняемых ХТО / В. И. Шапочкин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1987. — № 5. — С. 12–15.

12. Зубарев, Н. И. Оптимизация качественных параметров зацепления зубчатой передачи / Н. И. Зубарев, М. П. Игдалов // Тракторы и сельхозмашины. — 1989. — № 2. — С. 41–69.

13. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. — Киев : Наукова думка, 1976. — 415 с.

14. Обеспечение на стадии производства заданной долговечности групп роликовых подшипников в зависимости от твердости их деталей / В. Е. Касьянов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2000. — № 8. — С. 15–18.

15. Онишков, Н. П. Местное напряженное состояние и оценка глубинной контактной прочности поверхностно-упрочненных зубчатых передач Новикова : дис. … канд. техн. наук / Н. П. Онишков. — Харьков, 1991. — 164 с.

16. Сталь ШХ-15 [Электронный ресурс] / Центральный металлический портал РФ. — Режим доступа: metallicheckiyportal.ru/marki_metallov/stk/SHX15 (дата обращения: 14.08.17).

17. Сахонько, И. М. Контактная выносливость закаленной стали в зависимости от геометрических параметров соприкасающихся тел / И. М. Сахонько // Контактная прочность машиностроительных материалов. — Москва : Наука, 1964. — С. 52–59.

18. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. — Москва : Машиностроение, 1983. — 525 с.

19. Котов, О. К. Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами. — Москва : Машиностроение, 1969. — 344 с.

20. Расчеты на прочность в машиностроении. [Том] I / С. Д. Пономарев [и др.]. — Москва : Машгиз, 1956. — 884 с.

21. Орлов, А. В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А. В. Орлов, О. Н. Черменский, В. М. Нестеров. — Москва : Машиностроение, 1980. — 110 с.

References

1. GOST 21354-87. Peredachi zubchatye, tsilindricheskie, evol'ventnye. Raschet na prochnost'. Gosudarstvennyy komitet po standartam. [GOST 21354-87. Cylindrical evolvent gears of external engagement. Strength calculation.] Moscow: Standartinform, 1988, 125 p. (in Russian).

2. British standard. Implementation of ISO 6336-1:1996. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Technical Committee MCE/5, Gears. London: BSI, 92 p.

3. Zinchenko, V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki. [Gear surface engineering by thermal-chemical treatment methods.] Moscow: Bauman University Publ. House, 2002, 303 p. (in Russian).

4. Yoshida, A., et al. Effect of case dept of fatigue strength. Bulletin of JSME, 1986, no. 247, pp. 228–234.

5. Konovalov, L.V., Petrova, I.M. Osobennosti tsiklicheskoy prochnosti konstruktsionnykh staley v oblasti dlitel'noy dolgovechnosti. [Features of cyclic strength of structural steels in long life area.] Vestnik Mashinostroeniya, 1998, no. 9, pp. 3–11 (in Russian).

6. Kalashnikov, A.S., Morgunov, Y.A., Kalashnikov, P.A. Sovremennye metody obrabotki zubchatykh koles. [Modern methods of processing gears.] Moscow: Spektr, 2012, 238 p. (in Russian).

7. Korotkin, V.I., Onishkov, N.P., Goltsev, A.V. K otsenke glubinnoy kontaktnoy vynoslivosti evol'ventnykh zubchatykh peredach s poverkhnostno uprochnennymi zub'yami. [To assessment of deep contact resistance of involute gears with surface-hardened teeth.] Vestnik Mashinostroeniya, 2008, no. 5, pp. 9–14 (in Russian).

8. Onishkov, N.P., Korotkin, V.I., Guznov, K.V. Ob uchete faktora tverdosti v kontaktnykh raschetakh detaley mashin. [On considering hardness factor in contact analysis of machine parts.] Vestnik NTU “KPI”, 2008, no. 28, pp. 76–84 (in Russian).

9. Fujita, K., Yoshida, A. Vliyanie glubiny tsementovannogo sloya i otnositel'nogo radiusa krivizny na dolgovechnost' pri kontaktnoy ustalosti tsemento-vannogo rolika iz khromomolibdenovoy stali. [Effect of carburized layer depth and relative curvature on life time under contact fatigue of carburized roller from chrome-molybdenum steel.] Journal of Engineering for Industry, 1981, no. 2, pp. 115–124 (in Russian).

10. Korotkin, V.I., Onishkov, N.P., Kharitonov, Y.D. Zubchatye peredachi Novikova. Dostizheniya i razvitie. [Novikov gearing. Achievements and development.] Moscow: Mashinostroenie -1, 2007, 384 p. (in Russian).

11. Shapochkin, V.I., et al. Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti tyazhelonagruzhennykh zubchatykh koles iz stali 20KhN3A, uprochnyaemykh KhTO. [Fatigue strength of heavy-loaded gears of 20XH3A steel hardened by TCT.] Metal Science and Heat Treatment, 1987, no. 5, pp. 12–15 (in Russian).

12. Zubarev, N.I., Igdalov, M.P. Optimizatsiya kachestvennykh parametrov zatsepleniya zubchatoy peredachi. [Optimization of qualitative parameters of gearing.]/ Tractors and Agricultural Machinery, 1989, no. 2, pp. 41–69 (in Russian).

13. Pisarenko, G.S., Lebedev, A.A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. [Deformation and Strength of Materials in Complex Stress State.] Kiev: Naukova dumka, 1976, 415 p. (in Russian).

14. Kasyanov, V.V., et al. Obespechenie na stadii proizvodstva zadannoy dolgovechnosti grupp rolikovykh podshipnikov v zavisimosti ot tverdosti ikh detaley. [Support of the specified life for roller bearing groups depending on their parts hardness at the stage of production.] Vestnik Mashinostroeniya, 2000, no. 8, pp. 15–18 (in Russian).

15. Onishkov, N.P. Mestnoe napryazhennoe sostoyanie i otsenka glubinnoy kontaktnoy prochnosti poverkhnostno-uprochnennykh zubchatykh peredach Novikova : dis. … kand. tekhn. nauk. [Local stress state and estimation of the deep contact strength of surface-hardened Novikov gearing: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Kharkov, 1991, 164 p. (in Russian).

16. Stal' ShKh-15. [ShKh-15 steel.] Tsentral'nyy metallicheskiy portal RF. [RF Central metal portal.] Available at: metallicheckiyportal.ru/marki_metallov/stk/SHX15 (accessed: 14.08.17) (in Russian).

17. Sakhonko, I.M. Kontaktnaya vynoslivost' zakalennoy stali v zavisimosti ot geometricheskikh parametrov soprikasayushchikhsya tel. [Back-to-back endurance of hardened steel depending on geometrics of contacting bodies.] Kontaktnaya prochnost' mashinostroitel'nykh materialov. [Contact strength of engineering materials.] Moscow: Nauka, 1964, pp. 52–59 (in Russian).

18. Geller, Y.A. Instrumental'nye stali. [Instrument steels.] Moscow: Mashinostroenie, 1983, 525 p. (in Russian).

19. Kotov, O.K. Poverkhnostnoe uprochnenie detaley mashin khimiko-termicheskimi metodami. [Surface hardening of machine parts by thermal-chemical methods.] Moscow: Mashinostroenie, 1969. — 344 с.

20. Ponomarev, S.D., et al. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. Tom I. [Stress calculations in engineering.] Moscow: Mashgiz, 1956, 884 p. (in Russian).

21. Orlov, A.V., Chermenskiy, O.N., Nesterov, V.M. Ispytaniya konstruktsionnykh materialov na kontaktnuyu ustalost'. [Contact fatigue test of structural materials.] Moscow: Mashinostroenie, 1980, 110 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 19.05.2017
Сдана в редакцию 19.05.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 19.05.2017
Submitted 19.05.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Онишков Николай Петрович,
доцент кафедры «Автотранспортные, строительные и дорожные средства» Академии строительства и архитектуры Донского государственного технического университета (РФ, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1105-8342
onishkova1@yandex.ru

Onishkov, Nikolay P.,
associate professor of the Trucking, Construction and Road Facilities Department, Academy of Construction and Architecture, Don State Technical University (RF, 344006, Rostov-on-Don, ul. Sotsialisticheskaya, 162), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1105-8342
onishkova1@yandex.ru

Короткин Виктор Ильич,
ведущий научный сотрудник Института математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (РФ, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4772-7181
korotkin@math.rsu.ru

Korotkin, Victor I.,
senior research scholar, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (RF, 344006, Rostov-on-Don,. Stachky pr, 200/1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4772-7181
korotkin@math.rsu.ru